

УДК 615.83

doi:10.20998/2413-4295.2018.09.08

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ГЕНЕРАТОРА ОЗОНА ОТ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ И КОНСТРУКЦИИ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ

Н. В. МАХОНИН*

Кафедра промышленной и биомедицинской электроники, НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА
*email: nikalas1990@gmail.com

АННОТАЦИЯ В статье приводятся параметры разрядной камеры генератора озона, а также параметры газа, которые оказывают влияние на производительность генератора озона. Приведена типичная конструкция разрядной камеры, показано влияние напряжения горения разряда на производительность. Проведены исследования влияния параметров газа, а также величины зазора между пластинами на величину напряжения горения разряда в газовом промежутке. Получены результаты и определены параметры, оказывающие наиболее значительное влияние.

Ключевые слова: генератор озона; разрядная камера; напряжение горения; относительная плотность газа; озон-кислородная смесь

DETERMINATION OF DEPENDENCE OF VOLTAGE OF THE OZONE GENERATOR DISCHARGE CHAMBER FROM EXTERNAL FACTORS AND DESIGN OF DISCHARGE CHAMBER

М. МАХОНІН*

Industrial and biomedical electronics department, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Parameters of the discharge chamber of the ozone generator, as well as the parameters of the gas that affect the performance of the ozone generator are given in the article. The purpose of this work is to investigate the influence of the gap width in the discharge gap of the ozone generator chamber and the parameters of the gas used (for medical ozone generators it is exclusively oxygen) on the burning voltage of the discharge of the gas gap and the determination of the factors that have the greatest influence on this voltage. A typical construction of a discharge chamber is given; the effect of the burning voltage of a discharge on the productivity is shown. Mathematical dependencies between the value of the burning voltage of the discharge and the factors that influence the change of this parameter are described. Studies of the influence of gas parameters, as well as the gap between plates on the value of the discharge burning voltage in the gas gap are conducted. It is shown that to reduce the influence of disturbing factors, as well as to reduce the value of the burning voltage of the discharge in the discharge chamber of the ozone generator, it is necessary to reduce the distance between the electrodes. The values of the effect on the value of the burning voltage of the discharge in the discharge chamber are given when the gas temperature changes within 50% of the initial temperature and the gas changes within 15% of the initial value. The conclusions describe the obtained results, determine the parameters that have the greatest impact, and also the optimization problem for finding the optimal combination of parameters when using an ozone generator for medical purposes.

Keywords: ozone generator; discharge chamber; discharge voltage; relative gas density; ozone-oxygen mixture

Введение

Для обеспечения проведения процедур озонотерапии и достижения максимального лечебного эффекта, медицинский генератор должен точно поддерживать заданную врачом дозу озона, которую получит пациент [1]. В свою очередь доза озона определяется как произведение расхода озон-кислородной смеси на концентрацию озона в этой смеси. Для измерения концентрации озона на выходе генератора применяются специальные измерители. Однако они обладают достаточно большим временем регистрации результатов измерения, поэтому при производстве генераторов озона существует практика отказа от измерителей и применения управления генератором озона на основе заранее определенных зависимостей [2].

Синтез озона происходит в разрядной камере генератора озона при подаче на ее электроды переменного напряжения высокой амплитуды. Если при этом электроды покрыты диэлектриком, то происходит образование барьерного разряда. Такой разряд, при прохождении через газ, который содержит кислород, приводит к генерации озона. Во время работы генератора озона необходимо учитывать условия окружающей среды, а именно изменение температуры газа, а также изменение его давления в разрядной камере, которые выступают в роли возмущающих факторов. Это может привести к отклонению реальной концентрации озона на выходе пневматического тракта генератора от заданного значения, что негативно скажется на лечебном эффекте оказываемой процедуры озонотерапии [4].

С другой стороны необходимо повышение эффективности производства озона в генераторе. Одним из способов повышения эффективности генератора озона является понижение значения напряжения пробоя газа в разрядной камере, что приведет к увеличению количества озона при подаче на камеру того же количества энергии.

Цель работы

Целью данной работы является исследование влияния ширины зазора в разрядном промежутке камеры генератора озона и параметров применяемого газа (для медицинских генераторов озона газом является исключительно кислород) на напряжение горения разряда газового промежутка и определение факторов, которые оказывают наибольшее влияние на это напряжение.

Изложение основного материала

В современных медицинских генераторах озона наиболее широкое распространение получила разрядная камера коаксиального типа [5]. Такая камера позволяет эффективно использовать всю площадь электрода и является более компактной, что важно для минимизации размеров генератора озона. Сечение разрядной камеры коаксиального типа показано на рисунке 1. Такая камера состоит из внутреннего высоковольтного электрода (позиция 1), внешнего земляного электрода (позиция 2). Эти электроды разделяются слоем диэлектрического материала (позиция 2,4), а также зазора (позиция 3), через который протекает газовая смесь.

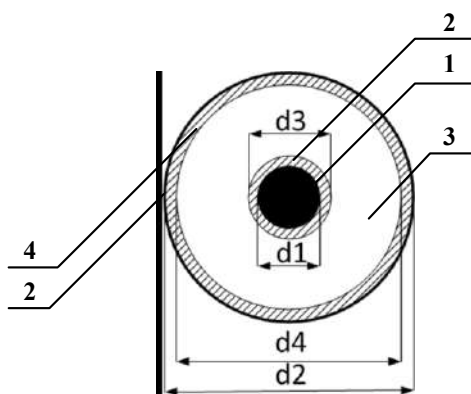


Рис. 1 – Сечение коаксиальной разрядной камеры с двумя диэлектриками.

При этом на генерацию озона непосредственное влияние оказывают такие конструктивные параметры разрядной камеры [6], как:

- геометрический размер разрядной камеры;
- эффективная разрядная площадь электродов;
- диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

- диэлектрические свойства газа, который используется (кислород или воздушная смесь);
- ширина диэлектрика, который покрывает электроды;
- ширина воздушного зазора между диэлектриками.

Эти параметры оказывают непосредственное влияние на электрические параметры разрядной камеры, а именно определяют ее электрическую емкость и напряжение горения разряда в газовом промежутке.

В свою очередь, количество озона, которое образуется в разрядной камере, в основном, зависит от мощности, которая выделяется в ней [7]. При этом часть вырабатываемой электрической мощности идет на образование озона, а другая часть выделяется в виде тепла, которое приводит к повышению температуры рабочей зоны разрядной камеры:

$$P_{\text{пол}} = P_{\text{нагрев}} + P_{\text{ген}} \quad (1)$$

Ввиду сложности процесса протекания разряда в разрядной камере, а также процессов генерации и разложения озона, существуют только эмпирические выражения для расчета мощности, которая выделяется в разрядном промежутке на образования озона. Согласно известным уравнениям [8] для высокочастотного генератора озона полезная мощность находится по следующему выражению:

$$P_{\text{пол}} = 4 \cdot f \cdot C_d \frac{C_d}{C_r + C_r} U_p (U_m - U_p), \quad (2)$$

где f – частота питающего напряжения, U_m – величина подаваемого на разрядную камеру напряжения, U_p – напряжение горения разряда.

Из этого выражения следует, что образование озона происходит при условии, когда амплитудное значение питающего напряжения превышает значение напряжения горения разряда, то есть $U_m > U_p$.

Для получения барьерного разряда в разрядной камере необходимо обеспечить достаточный уровень разности потенциалов между изолированными электродами. Данное напряжение, называемое напряжением горения разряда, определяется следующими уравнениями [9]:

$$U_D = \frac{B(\delta s)}{C + \ln(\delta s)}; \quad (3)$$

$$B = A_\delta \cdot U_U; \quad (4)$$

$$C = \ln \frac{A_\delta}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})}. \quad (5)$$

Здесь δ – относительная плотность газа, которая определяется как произведение давления и

температуры газа, s – расстояние разрядного промежутка, U_U – напряжение, необходимое для ионизации молекул газа, A_δ – коэффициент ионизации, γ – коэффициент вторичной ионизации.

Из этих уравнений следует, что напряжение возникновения разряда зависит в основном от произведения величины относительной плотности газа на расстояние между диэлектриками в разрядной области. Остальные значения являются константами для конкретного типа газа. Для кислорода, который поступает в разрядную камеру генератора озона, такие постоянные принимают значения, указанные в таблице 1 [10,11].

Таблица 1 – Параметры используемого газа

Тип газа	Параметры газа		
	A_δ , 1/см	U_U , эВ	γ
Кислород	12500	12,5	18

Исследование зависимостей

Было проведено исследование зависимости значения разрядного напряжения от изменения таких параметров рабочего газа как температура и давление, согласно формулам (3,4,5). При проведении исследования использовались различные значения ширины зазора между диэлектриками, что также оказывало влияние на напряжение горения разряда в разрядной камере.

В первом случае проводилось исследование влияния температуры подаваемого газа (кислорода). При этом расстояние разрядного промежутка принималось равным от 1 до 5 мм, что соответствует типичным значениям газового промежутка разрядной камеры медицинского генератора озона [12]. Были получены графики зависимостей для кислорода при нормальном атмосферном давлении. Результаты представлены на рисунке 2.

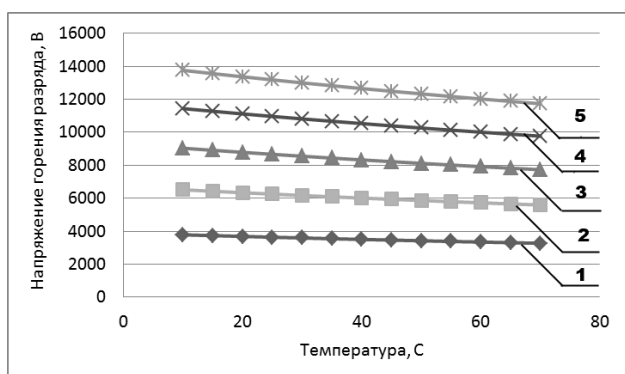


Рис. 2 – Зависимость напряжения горения разряда от температуры подаваемого кислорода и значениях ширины разрядного промежутка: 1 – ширина промежутка 1 мм; 2 – ширина промежутка 2 мм; 3 – ширина промежутка 3 мм; 4 – ширина промежутка 4 мм; 5 – ширина промежутка 5 мм

Как видно из полученного графика, увеличение температуры кислорода, поступающего в разрядную камеру генератора озона, приводит к понижению напряжения горения разряда. При этом увеличение расстояния между электродами приводит к увеличению значения напряжения горения разряда.

Также была исследована зависимость влияния давления газа в разрядной камере на напряжение горения разряда. Ширина зазора между электродами составляла от 1 до 5 мм. Температура газа при этом составляла 20 С, что является нормальным условием при работе в помещении. При исследовании влияния на разрядное напряжение давления газа (кислорода) в газовом промежутке изменялось от 350 до 1000 мм. рт. ст. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

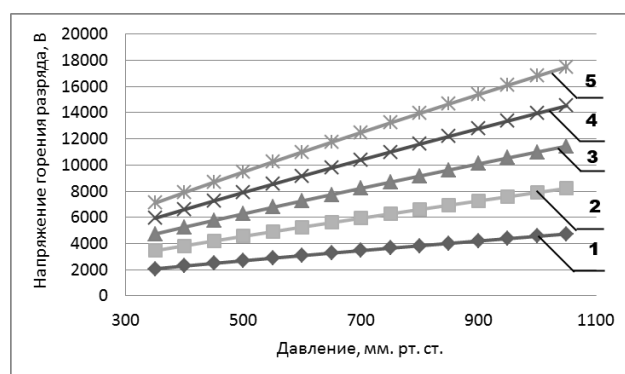


Рис. 3 – Зависимость напряжения горения разряда от давления газа в разрядном промежутке при различных значениях ширины разрядного промежутка: 1 – ширина промежутка 1 мм; 2 – ширина промежутка 2 мм; 3 – ширина промежутка 3 мм; 4 – ширина промежутка 4 мм; 5 – ширина промежутка 5 мм

Как видно из графика, увеличение значения давления газа в разрядной камере приводит к росту значения напряжения горения разряда. Степень влияния температуры и давления на этот параметр представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Отклонение напряжения горения разряда

Изменяемый параметр	Отклонение напряжения горения разряда, %				
	Расстояние между пластинами, мм				
	1	2	3	4	5
Давление газа, отклонение составляет 15%	10,3	10,7	10,9	11	11,1
Температура, отклонение составляет 50%	2,5	2,6	2,7	2,72	2,74
Расстояние между электродами, отклонение составляет 50 %	36,9	38,6	39,4	39,9	40,3

Как видно из таблицы, изменение температуры рабочего газа в диапазоне 50 % приводит к изменению напряжения горения разряда в разрядной камере менее чем на 3 %. Для уменьшения этого влияние, исходя из полученных зависимостей, следует уменьшать расстояние между электродами в разрядной камере. В свою очередь, изменение давления газа в рабочей области разрядной камеры на 15% от установленного приводит к изменению значения напряжения горения разряда на 10-11%. Из этих данных можно сделать вывод, что изменение давления влияет на изменение величины горения разряда почти в 10 раз больше, нежели изменения температуры. Однако, как было сказано ранее, оба этих параметра (давление и температура рабочего газа) являются возмущающими факторами при работе генератора озона, которые необходимо учитывать при расчете производительности озона, а также, желательно, уменьшить их степень влияния на работу генератора озона. Исходя из полученных данных, для улучшения работы генератора озона, то есть уменьшения значения напряжения горения разряда и уменьшения влияния возмущающих факторов, необходимо применять разрядную камеру с минимальным зазором между электродами. Но при этом необходимо учитывать, что для обеспечения проведения процедуры озонотерапии генератор озона должен обеспечивать заданный расход озон-кислородной смеси. И чем меньше зазор в разрядной камере генератора озона, тем большее значение давления понадобится для обеспечения заданного расхода.

Выводы

В результате исследований было определено, что уменьшение давления в газовом промежутке разрядной камеры, а также повышение температуры газа приводит к уменьшению напряжения горения разряда. При этом изменение давления газа в разрядной камере оказывает более существенное влияние на значение напряжения горения разряда. Также существенное влияние на эту величину оказывает ширина зазора между электродами, и уменьшение этого параметра также приводит к уменьшению напряжения горения разряда. То есть, для обеспечения минимального значения горения разряда необходимо уменьшение расстояния между электродами, то есть уменьшения зазора в разрядной области генератора озона.

Однако, для обеспечения необходимых условий при проведении процедур озонотерапии, а в этом случае – обеспечение заданного расхода озон-кислородной смеси на выходе пневматического тракта генератора озона, при минимальном расстоянии между электродами придется повышать давление газа в разрядной области. Как видно из рисунка 3 это приведет к повышению значения напряжения горения разряда.

Отсюда можно сделать вывод, что необходимо решение задачи оптимизации для нахождения оптимального значения этих параметров при применении генератора озона для проведения процедур озонотерапии.

Список литературы

1. Маслеников, О. В. *Практическая озонотерапия. Пособие* / О. В. Маслеников, К. Н. Конторщикова. – Н. Новгород: Изд-во «Вектор - ТиС», 2003. – 52 с.
2. Sokol, E. I. The Analysis of Technical Solutions for Medical Ozonators / E. I. Sokol, A. V. Kipenskiy, V. V. Kulichenko, R. S. Tomashevskiy, T. M. Barkhotkina // *2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. – 2013. – pp. 262-265. – doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552047.
3. Сокол, Е. И. Об особенностях регулирования концентрации озона в медицинском озонаторе / Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, А. А. Лашин [и др.] // *Матеріали наук.-практ. конф. «Нові технології оздоровлення природними та преформованими факторами»*. – Харків: ХМАПО, 2002. – С. 229-231.
4. Кипенський, А. В. Пневмоелектромеханічна система управління расходом озон-кислородної суміші в медичному озонаторі / Кипенський, А. В. Куличенко В. В., Махонін Н. В. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №36. – С. 186-188.
5. Konelschatz, U. Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications / U. Konelschatz, B. Eliasson and W. Egli // *Journal of Physique IV Colloque*. – 1997. – 07 (C4). – pp.C4-47-C4-66. – doi:10.1051/jp4:1997405.
6. Takaki, K. Influence of electrode configuration on ozone synthesis and microdischarge property in dielectric barrier discharge reactor / K. Takaki, Y. Hatanaka, K. Arima, S. Mukaigawa, T. Fujiwara // *Vacuum*. – 2009. – 83. – pp. 128-132. – doi: 10.1016/j.proeng.2012.02.035.
7. Samaranayake, W. J. M. Ozone production using pulsed dielectric barrier discharge in oxygen / W. J. M. Samaranayake, Y. Miyahara, T. Namihira, S. Katsuki, R. Hackam, H. Akiyama, // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* – 2000. – pp. 849-854. – doi: 10.1109/94.891999.
8. Masschelein, W. J. Ozone Generation: Use of Air, Oxygen or Air Simponized with Oxygen / W. J. Masschelein // *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*. – 1998. – 20:3. – p. 191-203. – doi: 10.1080/01919519808547271.
9. Долгинов, А. И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике / А. И. Долгинов. – М., Энергия. – 1968. – 464 с.
10. Takaki, K. Influence of electrode configuration on ozone synthesis and microdischarge property in dielectric barrier discharge reactor / K. Takaki, Y. Hatanaka, K. Arima, S. Mukaigawa, T. Fujiwara // *Vacuum*. – 2009. – 83. – pp. 128-132. – doi: 10.1016/j.proeng.2012.02.035.
11. Shuiliang, Y. Study of ozone generation in an atmospheric dielectric barrier discharge reactor / Yao Shuiliang, Zuliang Wu, Jingyi Han, Xiujuan Tang, Boqiong Jiang, Hao Lu, Sin Yamamoto, Satoshi Kodama // *Journal of Electrostatics*. 2015. – V. 75. – pp. 35-42. – doi: 10.1016/j.elstat.2015.03.001.
12. Кипенський, А. В. Характеристики и результаты эксплуатации медицинского озонатора ОМ 80/1. / А. В. Кипенський, Е. И. Сокол, А. А. Лашин и др. // *Общая*

реаниматология. – М.: НИИ общей реаниматологии РАМН, 2006. – Т. 2. – № 4/1. – С. 297-301.

Bibliography (transliterated)

1. Maslennikov, O. V., Kontorshchikova, K. N. Prakticheskaya ozonoterapiya. Posobiye. N. Novgorod: Izd-vo «Vektor - TiS», 2003, 52 s.
2. Sokol, E. I., Kipenskiy, A. V., Kulichenko, V. V., Tomashevskiy, R. S., Barkhotkina, T. M. The Analysis of Technical Solutions for Medical Ozonators. 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2013, 262-265, doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552047.
3. Sokol, E. I., Kipenskiy, A. V., Lashin, A. A. i dr. Ob osobennostyakh regulirovaniya kontsentratsii ozona v meditsinskom ozonatore. Materiali nauk.-prakt. konf. «Novi tekhnologii ozdorovlennya prirodniimi ta preformovanimi faktorami». Kharkiv: KhMAPO, 2002, 229-231.
4. Kipenskiy, A. V., Kulichenko, V. V., Makhonin, N. V. Pnevmoelektromekhanicheskaya sistema upravleniya raskhodom ozono-kislorodnoy smesi v meditsinskom ozonatore. Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Kharkiv: NTU «KhPI», 2013, №36, 186-188.
5. Konelschatz, U., Eliasson, B. and Egli, W. Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications. Journal de Physique IV Colloque, 1997, 07 (C4), C4-47-C4-66, doi:10.1051/jp4:1997405.
6. Takaki, K., Hatanaka, Y., Arima, K., Mukaigawa, S., Fujiwara, T. Influence of electrode configuration on ozone synthesis and microdischarge property in dielectric barrier discharge reactor. Vacuum, 2009, 83, 128-132, doi: 10.1016/j.proeng.2012.02.035.
7. Samaranayake W. J. M., Miyahara, Y., Namihira, T., Katsuki, S., Hackam, R., Akiyama, H. Ozone production using pulsed dielectric barrier discharge in oxygen. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2000, 849-854, doi: 10.1109/94.891999.
8. Masschelein, W. J. Ozone Generation: Use of Air, Oxygen or Air Simpsonized with Oxyge. Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association, 1998, 20:3, 191-203, doi: 10.1080/01919519808547271.
9. Dolginov, A. I. Tekhnika vysokikh napryazheniy v elektroenergetike. M.: Energiya, 1968, 464.
10. Takaki, K., Hatanaka, Y., Arima, K., Mukaigawa, S., Fujiwara, T. Influence of electrode configuration on ozone synthesis and microdischarge property in dielectric barrier discharge reactor. Vacuum, 2009, 83, 128-132, doi: 10.1016/j.proeng.2012.02.035.
11. Yao Shuiliang, Zuliang Wu, Jingyi Han, Xiujuan Tang, Boqiong Jiang, Hao Lu, Sin Yamamoto, Satoshi Kodama. Study of ozone generation in an atmospheric dielectric barrier discharge reactor. Journal of Electrostatics, 2015, 75, 35-42, doi: 10.1016/j.elstat.2015.03.001.
12. Kipenskiy, A. V., Sokol, E. I., Lashin, A. A. i dr. Kharakteristiki i rezultaty ekspluatatsii meditsinskogo ozonatora OM 80/1. Obshchaya reanimatologiya. M.: NII obshchey reanimatologii RAMN, 2006, 2. № 4/1, 297-301.

Сведения об авторах (About authors)

Махонин Николай Витальевич – ассистент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника»; г. Харьков, Украина; e-mail: Nikalas1990@gmail.com.

Mykola Makhonin – assistant, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: Nikalas1990@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Махонин, Н. В. Определение зависимости напряжения пробоя разрядной камеры генератора озона от внешних факторов и конструкции разрядной камеры / **Н. В. Махонин** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 57-61. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.08.

Please cite this article as:

Makhonin, M. Determination of dependence of voltage of the ozone generator discharge chamber from external factors and design of discharge chamber. Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 9 (1285), 57–61, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.08.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Махонін, М. В. Визначення залежності напруги пробоя розрядної камери генератора озона від зовнішніх факторів і конструкції розрядної камери / **М. В. Махонін** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 57-61. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.08.

АНОТАЦІЯ У статті наводяться параметри розрядної камери генератора озону, а також параметри газу, які впливають на продуктивність генератора озону. Наведено типову конструкцію розрядної камери, показано вплив напруги горіння розряду на продуктивність. Проведено дослідження впливу параметрів газу, а також величини зазору між пластинами на величину напруги горіння розряду в газовому проміжку. Показані отримані результати і визначено параметри надають найбільш значний вплив.

Ключові слова: генератор озона; розрядна камера; напруга розряду; відносна щільність газу; озono-киснева суміш

Поступила (received) 08.03.2018